

УДК 316.621.925

## Анализ работы дифференциально-фазной защиты при наложении короткого замыкания на доаварийный неполнофазный режим работы сети

Бобров С.Е., асп.

Дан анализ работы дифференциально-фазной защиты линий 110–220 кВ при наложении неполнофазного режима и короткого замыкания. Рассмотрены случаи наложения короткого замыкания на защищаемой линии и разрыва фаз на защищаемой и на смежной линиях.

Приводится алгоритм дифференциально-фазной защиты, исключающий отказы функционирования в указанных режимах, и методы, позволяющие исключить погрешности функционирования, вносимые высокочастотным каналом связи между полуккомплектами защиты.

*Ключевые слова:* дифференциально-фазная защита, неполнофазный режим, короткое замыкание, погрешность функционирования, высокочастотный канал связи.

## Analyzing Phase-Comparison Protection Operation when a Short Circuit Overlaps Prefault Open-Phase Network Operating Mode

S.E. Bobrov, Post Graduate Student

The author estimates the phase-comparison protection operation while combining both a short circuit and an open-phase operating mode. Separately, the author considers the combination of a breakage on the adjacent line and a three-phase fault on the protected line, as well as B and C phases breakage and one-phase short circuit in B phase on the protected line. The author presents the methods negating errors because of high-frequency communication between the subsets. The author gives fundamental principles of the algorithm, correcting defects of phase-comparison protection principle while combining both a short circuit and an open-phase operating mode.

*Keywords:* phase-comparison protection, open-phase operating mode, short circuit, errors, high-frequency transmission channel.

Принцип работы дифференциально-фазной защиты (ДФЗ) подразумевает сравнение фаз токов манипуляции по концам защищаемой линии. При этом ток манипуляции является суммой токов прямой и обратной последовательности, вычисляемый с учетом коэффициента манипуляции [1].

Соотношение между токами прямой и обратной последовательности на каждой из сторон защищаемой линии при коротком замыкании (КЗ) определяется распределением токов в нагрузочном и аварийном режиме. При этом в нагрузочном режиме может существовать несимметрия, вызванная неполнофазным режимом работы защищаемой или смежной линии на тяговую нагрузку. В связи с этим при внутреннем КЗ векторы токов прямой и обратной последовательностей могут как совпадать, так и находиться в противофазе. Согласно вышеуказанному, в некоторых случаях возможен отказ ДФЗ при КЗ в неполнофазных режимах из-за влияния токов, обусловленных напряжением в месте разрыва. Кроме этого, следует также отметить ухудшающее влияние переходных сопротивлений в месте КЗ в связи с уменьшением при этом составляющих токов аварийного режима КЗ, в то время как токи неполнофазного режима сохраняются неизменными [2].

Работа ДФЗ в указанных режимах приводит к уменьшению значения угла блокировки (т.е. при внутреннем КЗ измеренное значение

угла блокировки может принимать значение много меньше  $180^\circ$ ), а значит, к увеличению времени срабатывания ОСФ или, в наихудшем случае, к отказу защиты [3].

Кроме причин, связанных с соотношением токов в нагрузочном и дополнительном режимах, приводящих к уменьшению значения угла блокировки, существуют объективные, связанные с работой высокочастотного (ВЧ) канала связи между полуккомплектами защиты, установленными по концам защищаемой линии, влияющие аналогичным образом на конечное значение угла блокировки. К таковым относятся: конечное время пробега электромагнитной волны по каналу связи и накопление энергии в высокочастотных фильтрах приемника при приеме ВЧ-сигнала. Влияние работы ВЧ-канала связи показано в [4].

Ниже рассматривается работа ДФЗ при неполнофазных режимах, оценивается работа ОСФ с учетом воздействия ВЧ-канала связи при разных видах КЗ. Помимо этого, приводятся и оцениваются методы, позволяющие уменьшить время срабатывания ДФЗ и исключить отказ защиты при внутренних КЗ.

Оценка работы ДФЗ проводится на модели ЭЭС, включающей линию с двусторонним питанием, а также нагрузку, подключенную через силовой трансформатор. Вид моделируемой ЭЭС, а также параметры элементов ЭЭС приведены на рис. 1.

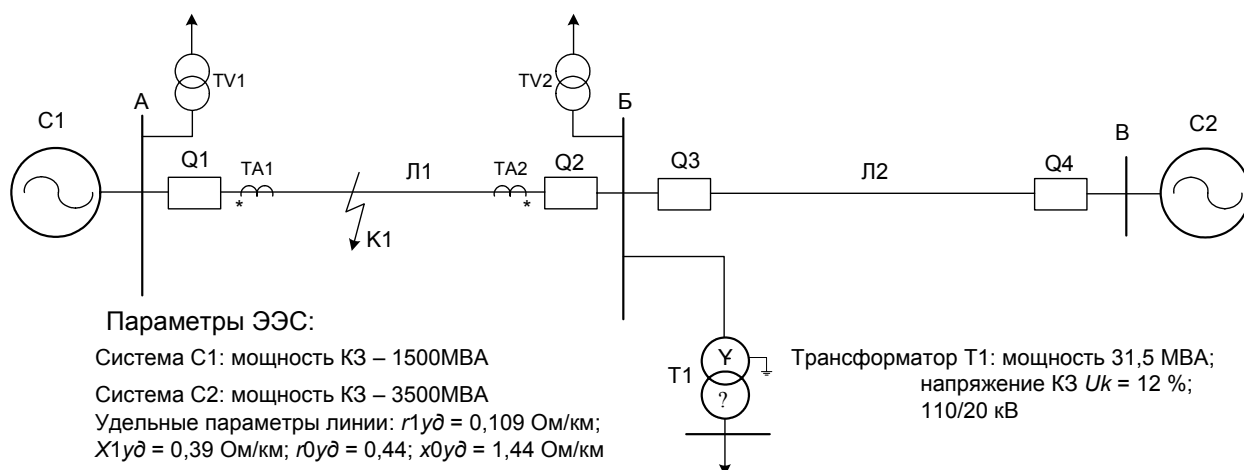


Рис. 1. Схема модели участка ЭЭС

Как указывалось выше, конечное значение угла блокировки зависит от вида и места КЗ, от длины линии и параметров приемопередатчиков, необходимых для передачи информации о фазе тока манипуляции на противоположный конец защищаемой линии. Расчетные значения угла блокировки, полученные при моделировании разных видов КЗ в сочетании с неполнофазным доаварийным режимом работы, приводятся в таблице. При расчете углов блокировки на каждой из сторон защищаемой линии учитывались параметры при-

емопередатчика ПВЗУ-Е, имеющего широкое распространение в отечественной электроэнергетике: время удлинения заднего фронта ВЧ-сигнала, принятого ВЧ-приемником от «своего» ВЧ-передатчика, – 1500 мкс; время удлинения заднего фронта ВЧ-сигнала, принятого ВЧ-приемником от ВЧ-передатчика противоположного конца линии, – 1300 мкс. Кроме того, была учтена длина защищаемой линии, равная 100 км, для расчета задержки при передаче ВЧ-сигнала по каналу связи – 6 град.

**Результаты расчетов угла блокировки при разных видах КЗ**

Вид КЗ	Расстояние до места КЗ, км	Угол блокировки без учета ВЧ-канала, град.	Угол блокировки с учетом действия ВЧ-канала на стороне ПС А, град.	Угол блокировки с учетом действия ВЧ-канала на стороне ПС Б, град.	Время срабатывания ОСФ в полуккомплекте ДФЗ на стороне ПС А, мс	Время срабатывания ОСФ в полуккомплекте ДФЗ на стороне ПС Б, мс
Разрыв в фазе А в начале защищаемой линии						
BC0	0	144	115,5	123	20	20
	50	153	124,5	132	20	20
	100	144	115,5	123	20	20
B0	0	162	133,5	141	20	20
	50	180	151,5	159	20	20
	100	162	133,5	141	20	20
C0	0	162	133,5	141	20	20
	50	171	142,5	150	20	20
	100	162	133,5	141	20	20
AB	0	99	70,5	78	40	60
	50	108	79,5	87	40	40
	100	108	79,5	87	40	40
Разрыв в фазах В и С в начале защищаемой линии						
A0	0	171	150	142,5	20	20
	50	180	159	151,5	20	20
A0	100	171	150	142,5	20	20
B0	0	54	33	25,5	–	–
	50	63	42	34,5	–	–
	100	54	33	25,5	–	–
AB	0	135	114	106,5	20	20
	50	144	123	115,5	20	20
	100	153	132	124,5	20	20
BC0	0	153	132	124,5	20	20
	50	162	141	133,5	20	20
	100	153	132	124,5	20	20
Разрыв в фазе А в начале смежной линии						
ABC	0	45	24	16,5	–	–
	50	99	78	70,5	40	60
	100	72	51	43,5	–	–

AB	0	108	87	79,5	40	40
	50	171	150	142,5	20	20
	100	162	141	133,5	20	20
BC	0	162	141	133,5	20	20
	50	171	150	142,5	20	20
	100	171	150	142,5	20	20
AC	0	153	132	124,5	20	20
	50	180	159	151,5	20	20
	100	171	150	142,5	20	20
AB0	0	81	60	52,5	60	–
	50	162	141	133,5	20	20
	100	126	105	97,5	20	20
BC0	0	171	150	142,5	20	20
	50	180	159	151,5	20	20
	100	162	141	133,5	20	20
AC0	0	135	114	106,5	20	20
	50	162	141	133,5	20	20
	100	162	141	133,5	20	20
Разрыв в фазах В и С в начале смежной линии						
A0	0	171	150	142,5	20	20
	50	180	159	151,5	20	20
	100	180	159	151,5	20	20
B0	0	45	24	16,5	–	–
	50	162	141	133,5	20	20
	100	162	141	133,5	20	20
C0	0	36	15	7,5	–	–
	50	171	150	142,5	20	20
	100	171	150	142,5	20	20
AB0	0	153	132	124,5	20	20
	50	171	150	142,5	20	20
	100	162	141	133,5	20	20
BC0	0	36	15	7,5	–	–
	50	180	159	151,5	20	20
	100	171	150	142,5	20	20
AC0	0	153	132	124,5	20	20
	50	171	150	142,5	20	20
	100	171	150	142,5	20	20

Для каждого вида КЗ в таблице приводятся три значения угла блокировки: без учета влияния ВЧ-канала связи; расчетное значение угла блокировки со стороны подстанции А с учетом влияния ВЧ-канала связи; расчетное значение угла блокировки со стороны подстанции Б с учетом действия ВЧ-канала связи. Последние два из указанных значений угла блокировки рассчитаны исходя из длины защищаемой линии, а также приведенных параметров приемопередатчика.

Кроме расчетных значений углов блокировки с учетом и без учета влияния ВЧ-канала связи в таблице приводится время срабатывания ОСФ с каждой из сторон защищаемой линии. Приведенное время срабатывания было вычислено из расчета того, что при угле блокировки более 90° ОСФ срабатывает за время одного периода. При значении угла, находящемся в диапазоне от  $\varphi_{БЛ.УСТ} + \frac{90^\circ - \varphi_{БЛ.УСТ}}{2}$  до 90°, время срабатывания составляет 40 мс, и в диапазоне  $\varphi_{БЛ.УСТ}$  до  $\varphi_{БЛ.УСТ} + \frac{90^\circ - \varphi_{БЛ.УСТ}}{2}$  – 60 мс. Прочерками указаны те случаи, когда происходит отказ работы ОСФ [5].

На основании данных, приведенных в таблице, можно заключить следующее:

– количество повреждений, при которых ОСФ срабатывает со временем менее 20 мс (без учета погрешности, вносимой ВЧ-каналом), составляет 86,3 % от общего числа повреждений;

– количество повреждений, при которых ДФЗ не срабатывает, – 9 %;

– количество повреждений, при которых ОСФ срабатывает со временем менее 20 мс, при учете влияния ВЧ-канала связи уменьшается на 8,8 %;

– количество повреждений, при которых ДФЗ не срабатывает, при учете влияния ВЧ-канала связи увеличивается на 30 %.

Данные, приведенные в таблице, рассчитаны для фиксированных параметров линии и ЭДС. При изменении параметров данные могут меняться. Для доказательства этого, а также для расширения области исследования работы ДФЗ в неполнофазных режимах работы ниже рассмотрены следующие виды КЗ: обрыв фазы А на смежной линии и трехфазное КЗ на защищаемой линии; обрыв фаз В и С и КЗ фазы В на землю.

Для исследования работы ДФЗ в приведенных режимах требуется составить уравнения расчета токов по концам защищаемой линии. Необходимые уравнения были получены на основе схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. На рис. 2 приведены схемы прямой и обратной последовательностей для каждого из рассматриваемых случаев. Следует учесть, что схемы обратной и нулевой последовательностей отличаются только значениями сопротивлений.

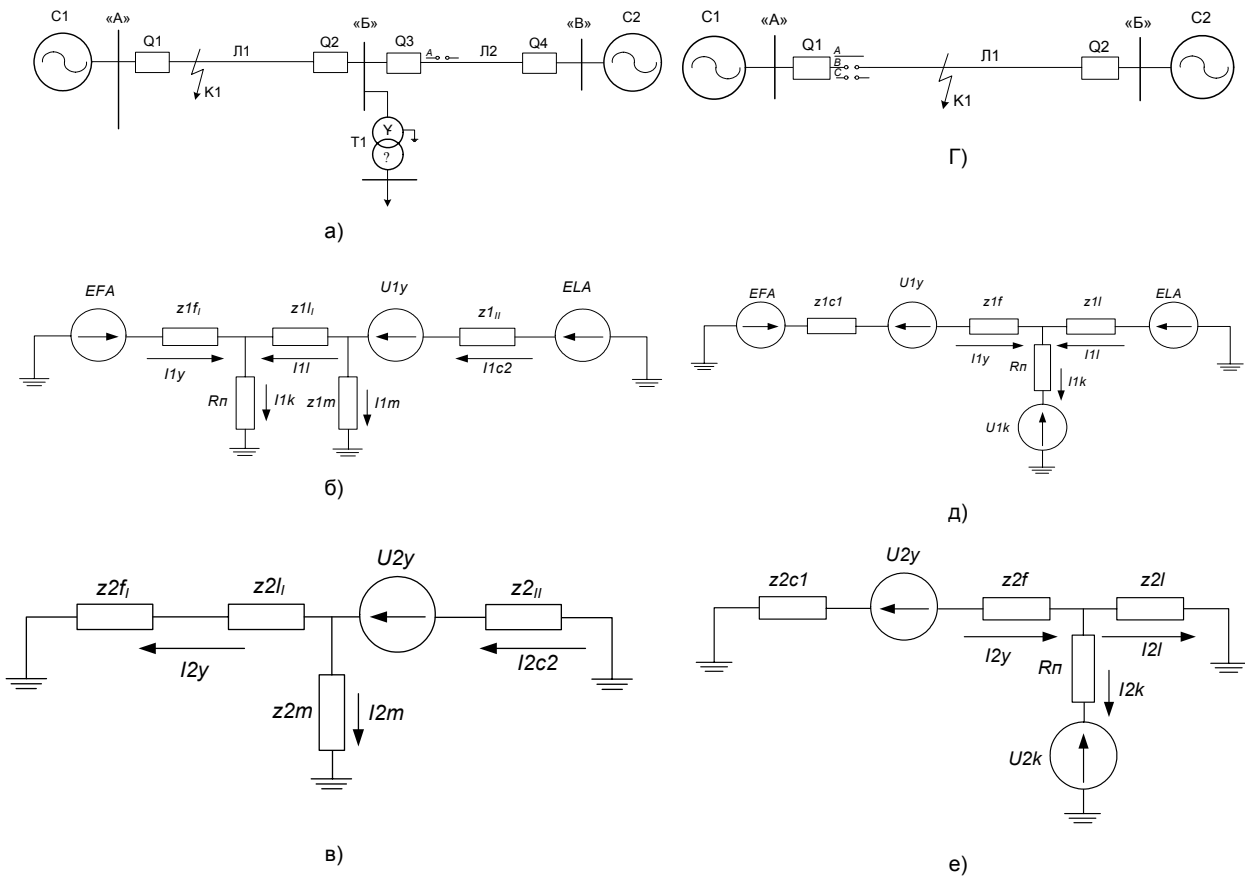


Рис. 2. Схемы замещения прямой и обратной последовательностей: а, б, в – исходная схема и схемы замещения прямой и обратной последовательностей, соответственно, при обрыве на смежной линии и трехфазном КЗ на защищаемой линии; г, д, е – исходная схема и схемы замещения прямой и обратной последовательностей, соответственно, при обрыве фаз В и С и КЗ фазы В на землю на защищаемой линии

Запишем граничные условия для каждого вида повреждения:

– обрыв фазы А:  $I_1 + I_2 + I_0 = 0$ ;

$$U_1 = U_2 = U_0;$$

– обрыв фаз В и С:  $I_1 = I_2 = I_0$ ;

$$U_1 + U_2 + U_0 = 0;$$

– трехфазное КЗ:  $I_2 = I_0 = 0$ ;

$$U_1 = U_2 = U_0 = 0;$$

– однофазное КЗ фазы В:  $a^2 \cdot I_1 = a \cdot I_2 = I_0$ ;

$$a^2 \cdot U_1 + a \cdot U_2 + U_0 = 0,$$

где  $a$  – оператор поворота вектора на  $120^\circ$ .

На основании представленных схем замещения и граничных условий были получены расчетные выражения токов:

– ток прямой последовательности со стороны, удаленной от точки обрыва, при обрыве на смежной линии и трехфазном КЗ:

$$I_{1y} = \frac{EFA - ELA - U_{1y} + I_{1c2} \cdot (z_{1ln} + z_{1lm})}{z_{1f} + z_{1ln}}, \quad (1)$$

где

$$z_{1ln} = \frac{z_{1l} \cdot r_n}{z_{1l} + r_n + z_{1m}}; \quad (2)$$

$$z_{1lm} = \frac{z_{1l} \cdot z_{1m}}{z_{1l} + r_n + z_{1m}}; \quad (3)$$

$$z_{1mn} = \frac{z_{1m} \cdot r_n}{z_{1l} + r_n + z_{1m}}; \quad (4)$$

$$I_{1c2} = \frac{U_{1y} \cdot \left(1 + \frac{z_{1f} + z_{1ln}}{z_{1mn}}\right) + ELA \left(1 + \frac{z_{1f} + z_{1ln}}{z_{1mn}}\right) - EFA}{z_{1lm} + z_{1ln} + z_{1f} + z_{1ln} + \frac{z_{1l} + z_{1m}}{z_{1mn}} \cdot (z_{1f} + z_{1ln})}; \quad (5)$$

$$U1y = \frac{EFA - ELA(1 + \frac{z1f_i + z1ln}{z1mn})}{1 + \frac{z1f_i + z1ln}{z1mn}} + \frac{z1lm + z1ll + z1f_i + z1ln + \frac{z1ll + z1lm}{z1mn} \cdot (z1f_i + z1ln)}{1 + \frac{z2l}{z2m}} + \frac{z0l}{1 + \frac{z0l}{z0m}}; \quad (6)$$

– ток прямой последовательности со стороны, ближайшей к месту обрыва:

$$I2y = I2l = \frac{U1y - I2c2 \cdot z2ll}{z2l}, \quad (8)$$

$$I1l = I1k - I1y, \quad (7)$$

где

$$I1k = \frac{EFA - I1y \cdot z1f}{r_{\Gamma}};$$

– токи обратной последовательности по концам защищаемой линии:

$$\text{где } I2c2 = \frac{U2y \cdot (1 + \frac{z2l}{z2m})}{z2ll + z2l + \frac{z2ll \cdot z2l}{z2m}};$$

– ток прямой последовательности со стороны обрыва при обрыве фаз В и С и КЗ фазы В на землю на защищаемой линии:

$$I1y = \frac{ELA \cdot (z1l + a \cdot z2l + a^2 \cdot z0l) + \Delta E \cdot (z1l + z2l + z0l + 3 \cdot r_{\Gamma})}{(z1 + z2 + z0) \cdot (z1l + z2l + z0l + 3 \cdot r_{\Gamma}) - (z1l + a^2 \cdot z2l + a \cdot z0l) \cdot (z1l + a \cdot z2l + a^2 \cdot z0l)}; \quad (9)$$

где а – оператор поворота вектора на 120°;

- ток прямой последовательности со стороны КЗ:

$$I1l = I1k - I1y, \quad (10)$$

$$\text{где } I1k = \frac{I1y \cdot (z1 + z2 + z0) - \Delta E}{z1l + a \cdot z2l + a^2 \cdot z0l};$$

– ток обратной последовательности со стороны обрыва равен току прямой последовательности;

– ток обратной последовательности со стороны КЗ:

$$I2l = I2y - I2k, \quad (11)$$

где  $I2k = a \cdot I1k$ .

На основе расчетов были получены объединенные графики значений углов блокировки при изменении следующих параметров: расстояния до места повреждения и угла между ЭДС в диапазоне от 0 до 60° (рис. 3).

Следует учесть, что графики, приведенные на рис. 3, не учитывают влияние ВЧ-канала связи, поэтому реальные значения углов блокировки по концам защищаемой линии меньше приведенных на рис. 3.

На рис. 4 в виде круговых диаграмм приведены процентные соотношения во времени работы ОСФ в рассматриваемых режимах при изменении расстояния до места КЗ и угла между ЭДС по концам защищаемой линии, а также расчетные данные, не учитывающие погрешности, связанные с передачей ВЧ-сигнала, и данные, полученные при наложении расчетных данных и погрешности, обусловленной влиянием ВЧ-канала связи.

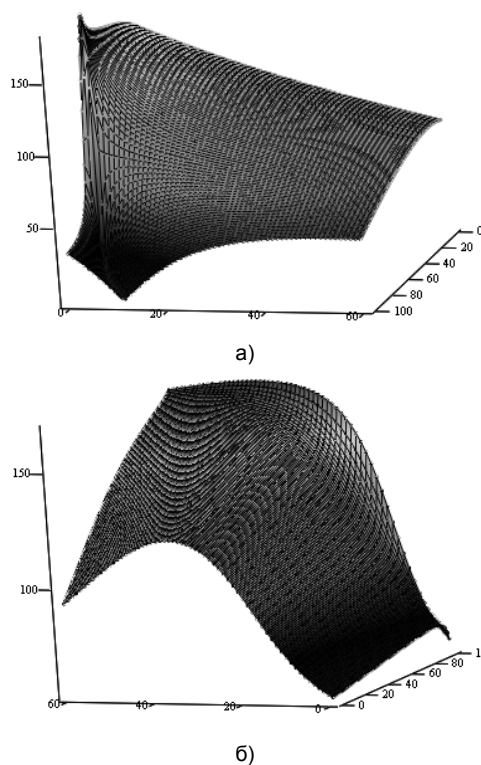


Рис. 3. Графики изменения значений угла блокировки при изменении расстояния до места КЗ и угла между векторами ЭДС: а – график изменения значений угла блокировки при обрыве в фазе А на смежной линии при трехфазном КЗ на защищаемой линии; б – график изменения значений угла блокировки при обрыве в фазах В и С и КЗ в фазе В на защищаемой линии

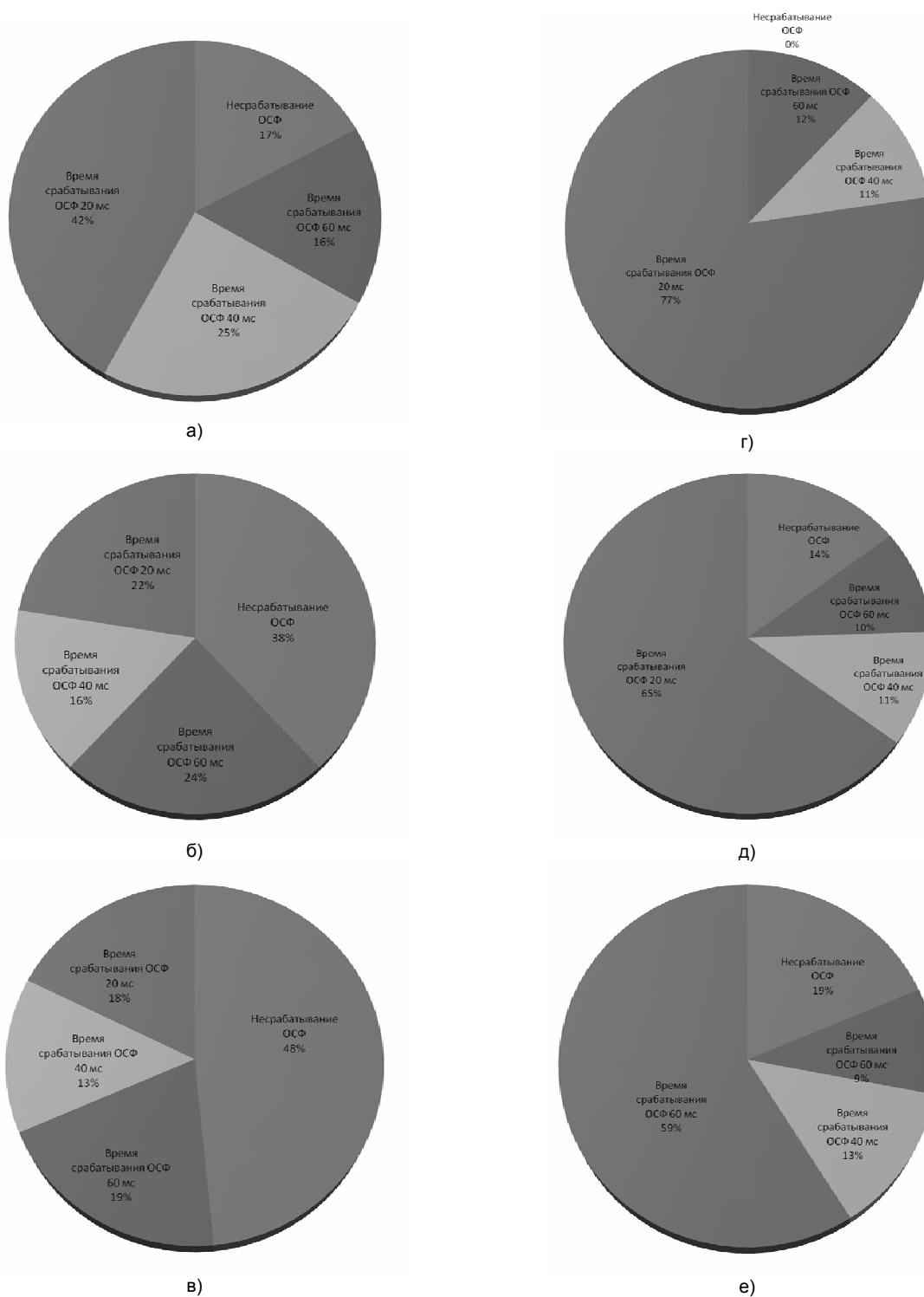


Рис. 4. Диаграммы распределения времени срабатывания ОСФ при изменении расстояния до места повреждения и угла между ЭДС: а, б, в – диаграммы распределения времени срабатывания ОСФ при сочетании обрыва фазы А на смежной линии и трехфазного КЗ на защищаемой линии на основе расчетных данных без учета и с учетом погрешности, вносимой влиянием ВЧ-канала связи; г, д, е – диаграммы распределения времени срабатывания ОСФ при сочетании обрыва фаз В и С и однофазного КЗ в фазе В на защищаемой линии

Анализ данных (рис. 4) показывает, что для режима обрыва фазы на смежной линии и трехфазного КЗ на защищаемой линии характерны прирост случаев несрабатывания ОСФ при учете влияния ВЧ-канала связи на 123 % и уменьшение случаев срабатывания ОСФ за время менее 20 мс на 58 % относительно расчетных данных. Для режима обрыва фаз В и С и

однофазного КЗ в фазе В на защищаемой линии характерны прирост случаев несрабатывания ОСФ, а значит, и несрабатывания ДФЗ на 14 % от общего числа рассматриваемых случаев при данном виде повреждения и уменьшение случаев срабатывания ОСФ за время менее 20 мс на 23,3 % относительно расчетных данных.

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что использование функции восстановления фазной характеристики, искажение которой связано с действием ВЧ-канала связи, значительно повышает надежность работы ДФЗ при наложении КЗ на неполнофазный режим работы.

Значения угла блокировки  $90^\circ$  и менее, полученные в результате исследования работы ДФЗ при вышеуказанных видах повреждений, обусловлены значительным влиянием тока обратной последовательности, источником которого является место разрыва, поскольку указанный ток, вне зависимости от места несимметрии (разрыва), одинаковый на каждой из сторон защищаемой линии. Поэтому при малом токе прямой последовательности в случае внутреннего КЗ, совмещенного с обрывом, соотношение между токами манипуляции соответствует внешнему КЗ.

Исследование соотношений между токами манипуляции при рассматриваемых видах внутренних КЗ, когда значение угла блокировки получается менее  $90^\circ$ , показало, что при изменении значения коэффициента манипуляции в выражении для одного из токов манипуляции по концам защищаемой линии приводит к увеличению угла блокировки. Статистические данные, собранные при исследовании, показали, что чем ближе значение угла блокировки, тем больше должны быть изменения в коэффициенте манипуляции. Однако, как было указано выше, значительное снижение угла блокировки при совмещении внутреннего КЗ и неполнофазного режима связано с протеканием тока обратной последовательности, источником которого является место разрыва. Поэтому, приняв в расчет тока манипуляции на одной из сторон защищаемой линии ток обратной последовательности со знаком «-», получим по всех исследуемых случаях значение угла блокировки более  $90^\circ$ . При этом указанное недопустимо при внешнем КЗ, поскольку приводит к ложному отключению защищаемой линии.

Критерии, на основании которых производится изменение значения или знака коэффициента манипуляции, являются обобщающими для всех рассмотренных случаев и должны учитывать протекание токов отдельных последовательностей на защищаемой линии, корректно работать в каждом полуккомплекте и не вносить коррективы при внешнем КЗ. На данный момент существует нехватка статистических данных для утверждения определенного критерия. Поэтому поиск необходимого критерия наличия внутреннего КЗ и неполнофазного режима является предметом дальнейшего исследования.

Бобров Сергей Евгеньевич,  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант,  
телефон 8-960-506-87-56,  
e-mail: serg@rza.ru

Помимо рассмотренных случаев, когда конечное значение угла блокировки во многом зависит от места КЗ и угла между ЭДС, имеется режим, при котором, вне зависимости от приведенных параметров, значение угла блокировки стремится к нулю, – однофазное КЗ с обрывом в той же фазе [1]. Усовершенствование работы ДФЗ в этом режиме возможно только за счет изменения общей функциональной схемы ДФЗ [6].

## Заключение

Работа дифференциально-фазной защиты во многом зависит от параметров сети, а также от места и вида повреждения. Анализ показал, что существует большая возможность увеличения времени срабатывания ДФЗ или отказа срабатывания защит при наложении неполнофазного режима работы сети и внутреннего КЗ.

Использование ВЧ-канала связи обуславливает уменьшение конечного угла блокировки вследствие задержки ВЧ-сигнала в канале связи и фильтрах ВЧ-приемника, что оказывает влияние на время срабатывания защиты при внутренних КЗ.

Использование ВЧ-канала связи обуславливает дополнительные погрешности функционирования ОСФ. Применение в алгоритме функционирования ДФЗ функции восстановления фазной характеристики значительно повышает устойчивость работы защиты.

Увеличение угла блокировки при внутренних КЗ возможно за счет коррекции коэффициента манипуляции одного из токов манипуляции защищаемой линии. Указанные коррекции необходимы только при обрыве фаз на смежной или защищаемой линии.

## Список литературы

1. **Атабеков Г.И.** Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.
2. **Чернин А.Б.** Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах. – М.; Л.: ГЭИ, 1963.
3. **Дони А.Н., Дони Н.А.** Особенности выполнения микропроцессорной ДФЗ ВЛ 110–750 кВ: Мат-лы SIGRE Relay protection and Substation Automation of Modern EHV Power Systems (Moscow – Cheboksary, September 10–12, 2007).
4. **Бобров С.Е.** Разработка и исследование алгоритма восстановления фазной характеристики дифференциально-фазной защиты // Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 5.
5. **Бобров С.Е.** Разработка и исследование алгоритма органа сравнения фаз дифференциально-фазной защиты линий напряжением 110–220 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2009. – № 2. – С. 97–101.
6. **Бобров С.Е.** Совершенствование работы дифференциально-фазной защиты при однофазном коротком замыкании с обрывом фазы // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 9. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 484–490.